



普通高等教育“十二五”规划教材

材料科学与工程导论

杨瑞成 张建斌 陈奎 居春艳 编著



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

材料科学与工程导论

杨瑞成 张建斌 陈奎 居春艳 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书试图从 21 世纪发展的角度看待材料问题(材料与人类文明、材料的可持续发展等)。在体现材料科学与工程领域大背景(第 1 章)及概述主要类型材料(第 2 章)的基础上,从材料的性能要求出发(第 3 章),按材料结构层次来设章展开,从材料的原子结构与结合键、材料的原子排列结构与缺陷、材料的热力学状态与动力学过程,以及如何改善、提高材料性能等方面(第 4~8 章),讲述了材料科学与工程的基本原理。第 9 章介绍各类材料和现代特殊材料的制备方法。各章有小结、思考题与习题,章末还特别设置了扩展阅读材料共 18 篇,以体现新颖性、时代性和趣味性,可供教师讲课时穿插选用和学生课后阅读。

本书可作为材料科学与工程、冶金工程、应用物理等相关专业本科生的教材,多数章节可供跨学科或公共选修课程选用,也可供相关专业研究生、教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料科学与工程导论/杨瑞成等编著. —北京:科学出版社,2012
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-03-034996-5

I. ①材… II. ①杨… III. ①材料科学—高等学校—教材 IV. ①TB3
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 135055 号

责任编辑:毛 莹 / 责任校对:钟 洋
责任印制:闰 磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中新伟业印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2012 年 8 月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:404 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是编者多年来从事材料科学与工程的教学、教改和精品课程建设以及相关科研工作的积累和总结。其前身为哈尔滨工业大学出版社出版的同名教材《材料科学与工程导论》(2002,多次重印),曾被国内多所院校使用,包括工科院校的材料类专业、理科院校的应用物理专业等。鉴于此书的适应性和广泛性,既可以作为材料科学与工程(MSE)专业的学科基础课教材,也可以用于材料成型、冶金工程等专业的导论性课程,还可以作为相关专业的跨专业选修课和全校性各专业的公共选修课的参考书等。长期以来,此书已成为多所院校考研(硕、博)的主要参考书之一。

本书在保持原版教材特色和普适性的基础上,作了较大幅度的修改。数章(第1、2、3、8、9章)重新编写,其他章全面修订,并更新、添加了一些内容。在各章末还特别增设了与相应章节内容密切相关的具有拓展、提高性质的扩展阅读材料共18篇(超级钢、生态环境材料、耗散结构、软物质材料、相变效应与“锡疫”、钨合金和穿甲弹、石墨烯、芳纶纤维等),以体现新颖性、时代性和趣味性,可供教师讲课时穿插选用和学生课后阅读。这些扩展阅读材料也在一定程度上体现了近年来多学科的交叉和材料科学与工程的发展,以及如何不断地从基础学科和相关学科汲取营养、拓展创新,如同几十年前MSE本身的创立一样。

类似名称的教材国外已有多册,其体系、内容、深度等均存在很大差异。国内自20世纪90年代以来,相继出版的几本相关教材基本按几大类材料(金属、陶瓷、高分子等)分成几大块,分别予以论述,并多以金属材料为主体。本书的思路与体系则有所不同,其指导思想是试图从21世纪发展的角度看待材料问题,体现材料与社会、人及自然相合一的思想,把材料与人类文明及生存,材料、能源、环境及材料的可持续发展等结合起来。在体现材料科学与工程领域大背景(第1章)及概述主要类型工程材料及其应用(第2章)的基础上,从材料的工程性能要求出发(第3章),按照材料结构层次的较新观点设置章节并展开,用5章的篇幅(第4~8章),从材料的原子结构与结合键、材料的原子排列结构与缺陷、材料的热力学状态(相和组织等)和动力学过程(原子激活、扩散运动及相关材料行为),以及如何改善、提高结构材料的性能等方面,讲述了材料科学与工程的主要原理。试图将大类材料的共性与个性有机地结合起来,注重材料科学与材料工程的交叉联系,并注意将学生学过的力学、物理、化学,尤其是物理化学的知识运用到材料系统中来,强调材料科学原理的应用,并与材料性质、行为相联系(如第4~7章每章的后二、三节)。第9章介绍了各类工程材料的主要制备方法与原理,以及现代一些特殊材料(单晶、非晶合金和纳米材料)的制备。每章有小结和思考题与习题。本书适用学时为24~48学时,教师使用本书时,可按各校的专业面向、课程性质及大纲要求选取相应的内容。

本书以材料科学与工程的基本概念、原理为基础,注重整体内容的系统性和工程实用性,并对新材料、新技术及材料新领域进行了适当介绍。使学生初步建立以材料的构成—原子结合(键)—组织结构—工艺—性能与行为的主线去学习和处理材料问题的思路,对工程材料的总貌与特性及制取加工等有一定程度的掌握与了解,并为后续课程的学习奠定基础 and 提供导引。希望本书有助于我国材料类、材料加工类专业和其他相关专业高级应用型人才的培养和卓越工程师计划的实施。其效果如何,敬请广大读者不吝指教。

本书是多校合作的结果,由杨瑞成担任主编(确定大纲、统稿定稿)并编写第4~7章和10篇扩展阅读材料,其他编者为张建斌(第1、2章和3篇扩展阅读材料)、陈奎(第8、9章和5篇扩展阅读材料)、居春艳(第3章)。对本书的完成作出贡献的还有郭铁明、南雪丽、刘芬霞、舒俊、孟威、杨娟、王彬、成佳辉、靳塞特、牛绍蕊、胡天雷、李杰、毕海娟、陈华、申鹏、吴量、张安明、夏渊、杨海歌、杨钊、杨新星等。

本书得到兰州理工大学规划教材建设基金的资助,特此致谢。

杨瑞成
2012年5月

目 录

前言

第 1 章 材料与人类	1
1.1 材料与人类文明.....	1
1.2 材料科学与工程兴起.....	5
1.3 材料科学与工程内涵.....	6
1.4 材料设计与材料选择.....	9
1.5 材料循环	11
本章小结.....	13
思考题与习题.....	13
扩展阅读材料 1: 超级钢	14
扩展阅读材料 2: 生态环境材料	15
第 2 章 工程材料概述	18
2.1 金属材料	18
2.2 陶瓷材料	27
2.3 高分子材料	32
2.4 复合材料	35
2.5 功能材料	38
本章小结.....	40
思考题与习题.....	41
扩展阅读材料 3: 高性能轻合金	41
扩展阅读材料 4: 高温结构材料	44
第 3 章 工程材料的基本性能	47
3.1 概述——材料性能的基本特征	47
3.2 工程材料的力学性能	50
3.3 工程材料的物理性能	67
3.4 工程材料的化学性能	74
3.5 不同类型材料的主要性能比较	77
本章小结.....	84
思考题与习题.....	84
扩展阅读材料 5: 超硬材料	84
扩展阅读材料 6: 钨合金和穿甲弹	86

第4章 材料的原子结构和原子间结合键	89
4.1 材料的结构与结构层次	89
4.2 孤立原子的特性	92
4.3 原子间作用力和结合能	96
4.4 原子间的结合键——一次键	99
4.5 原子间的结合键——二次键	103
4.6 原子间结合键与材料性质 I ——材料类型及一些原子参数	106
4.7 原子间结合键与材料性质 II ——弹性模量及其他相关性质	112
本章小结	115
思考题与习题	116
扩展阅读材料 7: 高分子材料的结构层次	116
扩展阅读材料 8: 材料结构层次的耦合和脱耦	118
第5章 固体材料中原子的排列与缺陷	121
5.1 聚集态与原子排列	121
5.2 固体材料中原子的周期排列结构	124
5.3 无机非金属材料(陶瓷)的结构	130
5.4 有机聚合物的原子排列	136
5.5 晶体材料的结构不完整性	139
5.6 原子排列与材料行为及性能 I : 材料密度、各类材料的性能	145
5.7 原子排列与材料行为及性能 II : 晶体滑移、各向异性和同素异构	147
本章小结	150
思考题与习题	151
扩展阅读材料 9: 准晶体	151
扩展阅读材料 10: 石墨烯、富勒烯和纳米碳管	153
第6章 固体材料热力学状态: 自由能、相图、相与组织	156
6.1 材料系统的熵、自由能与相平衡	156
6.2 材料系统影响自由能的因素	162
6.3 材料中的相组成	167
6.4 材料中的热力学 I : 自由能曲线与材料相图	173
6.5 材料中的热力学 II : 金属和陶瓷的一元相图与二元相图	176
6.6 材料中的热力学 III : 显微组织形貌及其对材料性能的影响	181
本章小结	188
思考题与习题	188
扩展阅读材料 11: 橡胶的熵致弹性	189
扩展阅读材料 12: 相变效应与“锡疫”	191

第 7 章 固体材料动力学过程:激活与扩散及相关材料行为	193
7.1 材料状态的改变、过程与激活能	193
7.2 玻尔兹曼分布与阿伦尼乌斯定律及其应用	196
7.3 金属材料中的原子扩散过程	199
7.4 离子晶体、共价晶体和聚合物中的扩散	204
7.5 材料中的动力学 I:扩散有关的几个材料行为	206
7.6 材料中的动力学 II:材料的相变与相变动力学特征	210
7.7 材料中的动力学 III:高聚物的结晶	219
本章小结	222
思考题与习题	222
扩展阅读材料 13:软物质材料	222
扩展阅读材料 14:材料中的耗散结构	225
第 8 章 工程材料强化与韧化的主要途径	229
8.1 晶体中的位错与材料强度	229
8.2 金属材料强化的基本途径	234
8.3 金属材料的断裂与韧化途径	242
8.4 陶瓷材料的强韧化	251
8.5 高分子材料的强韧化	254
8.6 材料表面强化及表面改性处理技术	258
本章小结	263
思考题与习题	263
扩展阅读材料 15:芳纶纤维	264
扩展阅读材料 16:ZrO ₂ 陶瓷的相变增韧	266
第 9 章 工程材料的制备	268
9.1 金属冶炼概述	268
9.2 钢铁的冶炼	270
9.3 有色金属冶炼和粉末冶金介绍	278
9.4 高聚物材料的制备	280
9.5 陶瓷材料的制备	283
9.6 复合材料的制备	287
9.7 现代特殊材料的制备简介	291
本章小结	296
思考题与习题	297
扩展阅读材料 17:碳纤维及其制备	297
扩展阅读材料 18:极端条件下的材料制备	299
主要参考文献	302

第 1 章 材料与人类

材料是人类文明、社会进步和科学技术发展的物质基础和技术先导。材料,尤其是新材料的研究、开发与应用反映出—个国家的科学技术和工业的总体水平。

本章阐述材料与人类文明的关系、材料科学与工程的内涵、材料循环以及材料设计与材料选择等方面的总体思路与战略考虑。

1.1 材料与人类文明

1.1.1 人类发展史上最伟大的材料事件

2006年9月,美国《金属杂志》(Journal of Metals, JOM)发起了旨在弘扬材料科学在人类历史发展进程中的影响力的“最伟大的材料事件”(the Greatest Materials Moments)活动,表 1-1 为按其重要性大小顺序排列的部分“最伟大材料事件”及其意义。“最伟大的材料事件”被定义为:—项人类的观测或者介入,导致人类对材料行为的理解产生标志性进展的关键或决定性事件,它开辟了材料利用的新纪元,或者产生了由材料引发的社会经济重大变化。可以据此来描述材料及其相关科学与技术的发展对人类文明、社会进步和科学技术发展所作出的巨大贡献。

在“最伟大的材料事件”中,有新材料、新器件和先进仪器的发明,有材料的新原理、新规律与揭示新结构的提出,有材料制备技术及工艺的发展,等等。中国古代开发的铁铸造工艺和使用高岭土制备首批精细陶瓷,榜上有名。

表 1-1 最伟大的材料事件

排序	年代	材料事件	意义、贡献
1	1864 年	门捷列夫(D Mendeleev)设计出元素周期表	成为材料科学家和工程师普遍使用的参考工具
2	公元前 3500 年(推测)	埃及人首次熔炼铁(或许是铜精炼的副产品),微量的铁主要用于装饰或礼仪	揭开了钢铁成为世界主导冶金材料的第一个制备秘密
3	1948 年	巴丁(J Bardeen)、布拉顿(W Brattain)和肖克利(W Shockley)发明晶体管	成为所有现代电子学的基石和微芯片与计算机技术的基础
4	公元前 2200 年(推测)	伊朗西北部人发明了玻璃	成为第二种伟大的非金属工程材料(继陶瓷之后)
5	1668 年(推测)	列文虎克(A Leeuwenhoek)制出超过 200 倍的光学显微镜	能够研究肉眼无法看到的自然世界及其结构
6	1755 年	斯米顿(J Smeaton)发明了现代混凝土(水凝水泥)	成为当代的主导建筑材料

续表

排序	年代	材料事件	意义、贡献
7	公元前 300年(推测)	南印度的金属业劳动者发展了坩埚炼钢	生产出几百年后成为著名的“大马士革”刀的“乌兹钢”(wootz),激发了数位工匠和冶金学家
8	公元前 5000年(推测)	在土耳其周边发现可以从孔雀石和蓝铜矿中萃取液体铜以及熔融的金属,可铸成不同的形状	成为冶金提取术——开发地球矿物宝藏的手段
9	1912年	劳厄(M Laue)发现晶体的X射线衍射	创建表征晶体结构方法,启发布拉格父子发展晶体衍射理论,深化对晶体结构与材料性能关系的理解
10	1856年	贝西默(H Bessemer)申请了底吹酸性炉炼钢过程专利	引领出廉价、大吨位炼钢时代,为运输业、建筑物和通用工业带来巨大进步
11	1876年	吉布斯(J W Gibbs)发表《论非均相物质之平衡》著名论文	成为现代热力学和物理化学的基础
20	1913年	玻尔(N Bohr)发表了原子结构模型的理论	提出电子环绕原子核做轨道运动,较外层电子数决定了元素的化学性质

1864年门捷列夫所设计的元素周期表,在表1-1的“最伟大的材料事件”中排名第一。此后,元素周期表成为材料科学家和材料工程师普遍使用的参考工具。

元素的物理性质、化学性质随原子序数逐渐变化的规律称为元素周期律。即随着原子序数的增加,元素的许多性质呈周期性的递变规律,如图1-1所示。最初,门捷列夫周期表中仅有66种元素,截至2012年,共包含118个确认的化学元素。

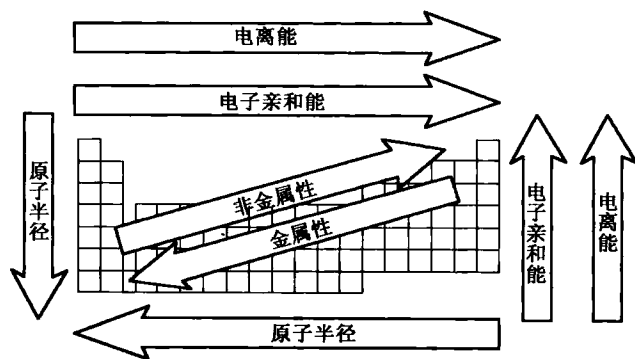


图1-1 元素周期表的规律性(箭头表示增大的方向)

材料是由元素之间相互作用构成的。可以认为,元素周期表及其基本规律是材料科学的主要基础之一。以上主要由周期表所得的启示,无论是对材料构成的本质和材料行为与特征的认识,还是研制和开发新材料,都具有不可估量的价值(参见4.2节)。

1.1.2 材料与物质

我们周围到处都是材料,那么,究竟什么是材料呢?美国材料科学与工程调查委员会将材料定义为:在机器、结构件、器件和产品中因其性能而成为有用的物质。

可见,材料(materials)和物质(substance)是既紧密联系又含义不同的两个概念。材料是物质,但不是所有物质都可以成为材料,材料总是和一定的应用场合相联系的。材料可由一种物质或若干种物质构成;同一种物质由于制备方法或加工方法的不同,可成为用途迥异的不同类型材料,如单晶体 Al_2O_3 成为宝石或激光材料,而多晶体 Al_2O_3 可制作集成电路的放热基板或高速切削工具。

国内普遍认同的材料定义为:材料是人类社会所能接受的、可经济地用于制造有用器件的物质,是人类赖以生存和发展的物质基础。

上一定义内含肖纪美院士论述的判断物质是否为材料的5条判据:资源、能源、环保、经济性及性能。即:

- ①“人类社会所能接受的”,反映资源、能源、环保的考虑与要求,为战略性判据;
- ②“可经济地”,反映了经济性指标,经济效益与社会效益,为经济性判据;
- ③“有用器件”,反映了各种性能要求,如力学性能、物理性能、化学性能等,为质量性判据。

因此,材料与物质间的关系可归纳为以下三方面内容,即材料是有用的并能用来制造物品(件)的物质;材料一般指固态的、可用于工程上的物质;作为材料科学的研究对象,主要是那些制造器件或物品的人造物质。

1.1.3 材料是人类文明的里程碑和社会发展的基础

历史上,人们将石器、铜器、铁器等材料的发展水平作为时代的标志(断代),称为石器时代(史前~公元前10000)、青铜器时代(公元前4000~公元前1000)、铁器时代(公元前1000~公元1620)。在近代,材料的种类繁多,各种新材料不断涌现,很难用一种材料来代表当今时代的特征,因此一般认为是铁器时代的延续。

100万年以前,人类获得的材料数量非常有限,通常使用的是天然材料,主要以石头为工具,还用木材、动物皮毛、黏土等,称为旧石器时代。在新石器时代,人类已经知道使用天然的金和铜,但因其尺寸较小、数量也少,不能成为大量使用的材料。后来,人类在找寻石料的过程中认识了矿石,在烧制陶器过程中又还原出金属铜,创造了炼铜技术,生产出各种青铜器物,从而进入青铜器时代。中国在商周(公元前17世纪初~公元前256)进入了青铜器的鼎盛时期,在技术上达到了当时世界顶峰。

公元前3500年,埃及人首次熔炼铁(或许是作为铜精炼的一种副产品),揭开了钢铁成为世界主导冶金材料的第一个制备秘密。由于铁比铜更易得到、更好利用,人类从此由青铜器时代进入铁器时代,一直延续到现在。由于铁便宜,大量开采和冶炼,铁成为“平民材料”,从而被普遍使用。公元前8世纪已出现用铁制造的犁、锄等农具,使生产力提高到一个新的水平。中国在春秋(公元前770~公元前476)末期,冶铁技术有很

大的突破,遥遥领先于世界其他地区,如利用生铁经过退火制造韧性铸铁以及生铁制钢技术的发明,标志着中国生产力的重大进步,这成为促进中华民族统一和发展的重要因素之一。这些技术从战国至汉代相继传到朝鲜、日本、西亚和欧洲地区,推动了整个世界文明的发展。

公元前 300 年,南印度的金属业劳动者发展了坩埚炼钢,生产出几百年后成为著名的“大马士革”刀的“乌兹钢”,激发了数代工匠、铁匠和冶金学家。1856 年贝西默(H Bessemer)申请了底吹酸性炉衬炼钢过程的专利,引领出廉价、大吨位炼钢时代,为运输业、建筑物和通用工业带来巨大进步。

第一次产业革命的突破口是推广应用蒸汽机,但只有在开发了铁和铜等材料之后,蒸汽机才得以使用并逐步推广;第二次产业革命以石油开发和新能源广泛使用为突破口,大力发展飞机、汽车和其他工业,支持这个时期产业革命的是当时合金钢、铝合金以及各种非金属材料的相继开发。从而金属材料在 20 世纪中占据了材料的主导地位。20 世纪 30 年代,人工合成高分子材料问世,并发展迅速,如今其世界年产量在 1 亿吨以上。应该指出,有些应归于非金属材料范畴的传统材料如木材、砖瓦、石料、水泥及玻璃等一直占有十分重要的位置。这些材料资源丰富,性能价格比在所有材料中最有竞争力。20 世纪 50 年代,通过合成化工原料或特殊制备方法,制造出一系列的先进陶瓷。由于其资源丰富、比重小、耐高温,很有发展前途,成为近三四十年来研究工作的重点之一。

随着科学技术的发展,与以上结构材料相对应,功能材料越来越重要,特别是半导体材料单晶硅的出现和对其属性的认识,促进了现代文明的加速发展,开启了信息时代。1948 年巴丁(J Bardeen)、布拉顿(W Brattain)和肖克利(W Shockley)发明了晶体管,成为所有现代电子学的基石和微芯片与计算机技术的基础。10 年后又研制成功集成电路,使计算机的功能不断提高、体积不断缩小、价格不断下降,加之高性能的磁性材料不断涌现、激光材料与光导纤维的问世,使人类社会真正进入了“信息时代”。

近、现代历史表明,材料与社会经济发展、地区开发乃至国家振兴是休戚相关的。英国和美国早在 1830 年就尝试以蒸气为动力并用于铁路运输,然而当时的铁轨仅仅是软钢带钉在厚木板上,故急需一种便宜、具有所需性能的金属。倘若没有 KELLEY(美国)和 BESSEMER(英国)制钢技术的发展,铁路事业不可能发展,那么美国就不可能开发西部,英国也不可能工业化。反过来,若无工业、农业对交通运输的需求,那么就缺乏对钢铁工业发展的刺激以及资本投入,当然钢铁制造技术进步的机会也就失去。

材料与经济之间密切关联的另一个例子涉及硅材料。经济上,它触发了一个数百亿美元的工业。从助听器到全球性的遥测技术,通信已十分便利,并且通过文化娱乐、各种私人计算机的出现与使用,人们的日常生活发生了巨大变化。

人类进入 21 世纪后,世界各发达国家都把材料科学和工程作为重大科学研究领域之一,并且根据材料及其在各领域的应用划分为以下几大部分:

——与信息的获取、传输、存储、显示及处理有关材料即信息功能材料;

——与宇航事业的发展、地面运输工具的要求相适应的高温、高比刚度和高比强度的高性能工程结构材料及先进的陶瓷材料；

——与能源领域有关的能源结构材料、功能材料与含能材料；

——以纳米材料为代表的作为当前材料科学技术前沿的低维材料；

——与医学、仿生学以及生物工程相关的生物材料；

——与信息产业相关的智能化材料；

——与环境工程相关的环境材料，也称绿色材料。

纵观人类利用材料的历史，可以清楚地看到，每一种重要材料的发现和利用，都会把人类支配和改造自然的能力提高到一个新的水平。给社会生产力和人类生活带来巨大的变化，把人类物质文明和精神文明向前推进一步。因此，材料是人类赖以生存的基础，材料的发展和进步伴随着人类文明发展和进步的全过程。

1.2 材料科学与工程兴起

1.2.1 材料学科形成的科学基础

材料科学是一门科学，它致力于材料本质的发现、解析，其目的在于提供材料结构的统一描绘或给出其模型，并解释这种结构与材料的性能之间的关系。

“材料科学”的形成是1960年代初及之后相关科学技术发展的结果。

第一，固体物理、无机化学、有机化学、物理学等相关基础学科对物质结构和物性的深入研究，促进了人们对材料本质的了解；同时，冶金学、金属学、陶瓷学、高分子科学等相关应用学科的发展也大大加强了对材料本身的研究，从而对材料制备、结构与性能以及它们之间的相互关系的研究也越来越深入，为材料科学的形成打下了比较坚实的基础。

第二，在材料科学这个名词出现以前，金属材料、高分子材料与陶瓷材料都已自成体系，目前复合材料也正在形成学科体系。它们之间存在着颇为相似之处，不同类型的材料可以相互借鉴，从而促进本学科的发展。如马氏体相变本来是金属学家提出来的，作为钢材热处理的理论基础，后来在氧化锆陶瓷中也发现了马氏体相变现象，并用来作为陶瓷增加韧性的一种有效手段。又如材料制备方法中的溶胶—凝胶法，是利用金属有机化合物的分解得到纳米级高纯氧化物粒子，现在成为改进陶瓷性能的有效途径。复合材料更需要借鉴其他材料的基础知识和制备方法。

第三，各类材料的研究设备与生产手段有颇多共同之处，如光学显微镜、电子显微镜、表面测试及物理性能与力学性能测试设备等。材料生产的许多加工装置也是通用的，如挤压机，既可以用于金属材料成形及冷加工以提高强度，也能用于某些高分子材料的挤压成丝，可使有机纤维的比强度、比刚度大幅度提高。研究与生产装备的通用不但可以节约资金，而且可以相互启发和借鉴，加速材料的发展。

第四，许多不同类型的材料可以相互代替和补充，能更充分发挥各种材料的长处，

达到物尽其用的目的。长期以来,金属、高分子及无机非金属材料相互分割,自成体系。由于互不了解,各分支的人员习惯只在本身的“小领域”内考虑问题,思路难以开阔。设计人员“因循守旧”,对采用异种类型材料持怀疑态度,这既不利于新材料的推广,又有碍于使用材料的行业的发展。显然,材料使用的综合而互补式思路是有益的。

第五,复合材料大多是不同类型材料的组合,如果不同类型材料没有一个全面的了解,作为新材料发展之一的复合材料的研究开发必然受到影响。

可见,材料科学是研究材料共性的一门科学。它是以固体物理、固体力学、热力学、动力学、量子力学、晶体学等为其理论基础的交叉应用学科,运用光学显微镜、电子显微镜、X-射线衍射、电子探针、离子探针以及热分析等各种精密仪器和技术手段,探讨材料的组成、结构、制备工艺和加工使用过程以及与其力学、物理、化学性能之间的规律。

1.2.2 材料科学与材料工程

材料工程是工程的一个领域,它的目的在于采用经济的而又能为社会所接受的生产工艺、加工工艺,控制材料的结构、性能和形状以达到使用要求。

材料科学和材料工程之间的区别主要在于着眼点的不同,它们当中并没有一条明确的分界线。材料科学着重于发现材料的本质,并由此对其结构与组成、性质、使用性能之间的关系作出描述与解释;而材料工程则是应用材料科学的理论和知识,对材料进行控制并实现其具体应用。材料科学或材料工程是一个多学科领域,涉及物质的性质及其在各个科学和工程领域的应用。

1.3 材料科学与工程的内涵

材料科学与工程(materials science and engineering, MSE)就是研究各种材料的成分/结构、制备/加工、性能以及使用性能之间关系的科学。近年来国内外材料界都把材料的成分/结构(composition/structure)、制备/加工(synthesis/processing)、性质(或性能, properties)以及使用性能(或使用效能, performance)称为材料科学与工程的四个基本要素,将它们连接在一起,便形成一个四面体,如图 1-2 所示。

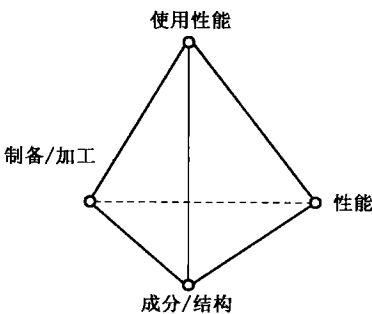


图 1-2 材料科学与工程的四要素与四面体

能, performance)称为材料科学与工程的四个基本要素,将它们连接在一起,便形成一个四面体,如图 1-2 所示。

1.3.1 成分与结构

成分与结构包括了决定材料性质和使用性能的原子类型和排列方式。

成分是指材料的化学组成及其所占比例。结构指组成材料的原子或离子在不同尺度上的排列,如宏观、微观的组织结构。

每种特定的材料都含有一个从原子、电子尺度到宏观尺度的结构体系。对于大多

数材料,所有这些结构尺度上的组成和分布是三维变化的,这是制造该种特定材料所采用的具体合成和加工方法的结果。而材料内部结构上多层次的丰富内容和复杂变化(参见4.1节)同样会引起与此相应的一系列复杂的材料性质。因此,在各种尺度上对材料的组成与结构的深入了解是材料科学与工程的主要方面。

1.3.2 制备与加工

本质上制备与加工是获得原子特定排列的方法和过程。具体来讲,就是指通过一定手段构建原子、分子及其聚集体的新排列,是在从原子尺度直到宏观尺度的所有尺度上对结构进行控制以及高效而有竞争力地制造材料和零件的演变过程。

制备的作用包括合成新材料、用新技术合成已知的材料或将已知的材料合成为新的形式以及将已知材料按特殊用途的要求来合成这样三个方面。

加工指将材料成形为有用产品或改变其性能。除了上述为生产出有用材料对其原子和分子的构成与状态进行控制外,加工还包括材料在较大尺度上的改变,有时也包括材料制造等工程方面的问题。材料加工涉及许多学科,是科学、工程以及经验的综合,是制造技术的一部分,也是整个技术发展的关键一步。一个国家保持先进的、强有力的材料加工技术,对各个工业部门实现高质量、高效率至关重要。

对于金属材料,一般而言是先合成制备(冶炼,如炼钢)再后续加工(如轧制、机械加工等)。但对一些材料,合成和加工之间的区别已变得越来越模糊了。高分子材料制造中的反应注射成形就是典型的一例,它是将单体快速混合、充模、聚合反应和最终成形融于一体,在瞬间完成。

合成和加工包括一系列各不相同的技术和工艺,如钢板的轧制、锻造、挤压、冲压成形,机械加工或切削成形,材料的热处理或表面改性(涂层等)处理,陶瓷粉末的压制和烧结合成,精细陶瓷粉末的溶胶-凝胶生产,半导体材料砷化镓晶体的生长,聚合物改性,混凝土的浇注,聚合物的化学反应制备以及层叠式复合材料的铺层,等等。

1.3.3 性质(性能)

性质也称为材料的固有性能,材料的性能是由组成原子及其排列(结构)决定的,它赋予材料的价值和可应用性,包括材料本身具有的力学性能(如强度、塑性、韧性等)、物理性能(如电、磁、光、热等性能)和化学性能(如抗氧化和抗腐蚀性、高聚物的降解等)。

性质是材料功能特性和效用(电、磁、光、热、力学等性质)的定量度量 and 描述。任何一种材料都有其特征的性能和由之而来的应用。例如,金属材料具有刚性、强度和硬度,可以用作各种结构件;金属还具有延性,可以加工成导电或受力用的线材(如导线和钢丝);一些特种合金,如不锈钢、形状记忆合金、超导合金等,分别可以用作耐蚀材料、智能材料和超导材料等。陶瓷有很高的熔点、高的硬度和化学惰性,可用作高温发动机和金属切削工具等;而具有压电、介电、电导、半导体、磁学等特征的特种陶瓷,可在相应的领域发挥作用。利用金刚石的耀度和透明性,可制成光灿灿

目的宝石和高性能光学涂层,而利用其硬度和导热性,可用作切削工具和传导材料。高分子材料以其独特的性能(易加工、便宜、一定强度以及绝缘性能等)可在各种不同的产品上发挥作用,如汽车等各类交通工具的内饰件、外装件、功能件等,还有建筑材料、电子电器材料等。

1.3.4 使用性能

使用性能又称效能或服役性能。使用性能是在考虑经济、社会成本和收益的基础上,材料在实际使用中有用性的度量。使用性能通常指材料做成零件或产品后在最终使用状态时的行为,是把材料固有性质与产品设计、工程应用能力和人类需要三方面相联系、相融合在一起的一个要素。度量使用性能的指标包括有效寿命、速度(器件或车辆的)、能量利用率(机器或运载工具的)、安全可靠程度和成本及寿命费用等,其他还有能量转换效率(如太阳能电池)、灵敏度(如传感元件),等等。

应指出的是,使用性能与材料的性能既紧密联系又相互区别。材料的性能(质)是在元器件或零件组装的设备实现预期的使用性能后而得到利用的。材料的性能是其使用性能的基础。显然,若无一定的强度水平,就无法保证所做成的构件(如吊车钢丝绳、飞机起落架等)具有所需的如承载能力等这样的使用性能;同样,没有绝缘性能,就无法保证泡沫塑料等所制成的保温层性能。但元器件、零件或设备的使用性能又不简单地等同于材料的性能。一方面,一般而言,材料的性能多系实验室条件下的简单性能(如单向拉伸、压缩等),带有很大的为规定性(如拉伸速度、试样尺寸及标距规定等),且一般是统一按国家标准进行测试并取得结果的;而使用性能多系在实际使用环境或工况下元器件、零件或设备考核出的复杂性能,如上述的使用寿命、可靠性等,带有很强的客观性和针对性(对应一定使用条件的)。另一方面,应注意和重视元器件、零件或设备在使用过程中其所用材料内部组织结构和性能的变化情况,这最终会对其使用性能产生重要影响。通常,产品供货状态的材料具有一整套满足实际设计要求的性能指标——强度、硬度、导电性、密度、色彩等。倘若在使用过程中,材料的内部结构没有变化,那么它将永远保持这些性能指标。但是,如果产品遇到使材料内部结构发生变化的使用情况,那么,可以肯定地说材料的性能与行为也会发生相应的变化。这就解释了为什么当橡胶暴露在阳光和空气中时会逐渐地硬化;为什么铝不能用在超音速飞机中;为什么金属在周期性的载荷作用下会产生疲劳;为什么普通钢的钻头不能像高速钢钻头那样飞快地切削;为什么磁体在射频场中会失去它的磁性;为什么半导体在核辐射下会损坏;等等。因此,不仅要考虑初始条件(具有一定材料性能的初始状态),而且还要考虑那些将使材料内部结构发生变化,并导致材料性能发生变化的使用条件(还要考虑材料的使用特性)。

总之,材料科学与工程包含四个要素——成分与结构、制备与加工、性能以及使用性能,它们是材料科学与工程的核心所在。四要素之间密切关联、相互作用形成了一个整体(MSE),构筑成了一个系统(材料系统),形成了一个领域(材料学科与材料世界)。因此,材料工作者的任务就是研究这四个要素以及它们之间的相互关系(这正是本书后

续各章的主线索),并在此基础上创造新材料和挖掘现有材料的潜力,满足各工程领域的要求,推动社会发展。

1.4 材料设计与材料选择

在材料科学与工程四要素的基础上,我国的材料工作者认为成分和结构是不同的两个参量,提出了五要素的六面体模型,如图 1-3 所示。在六面体的中心位置加入理论、材料设计与工艺设计;在性能和使用性能的基础上,分别衍生出材料选择和材料优化。这些发展无疑赋予材料科学与工程更为全面而丰富的内涵。

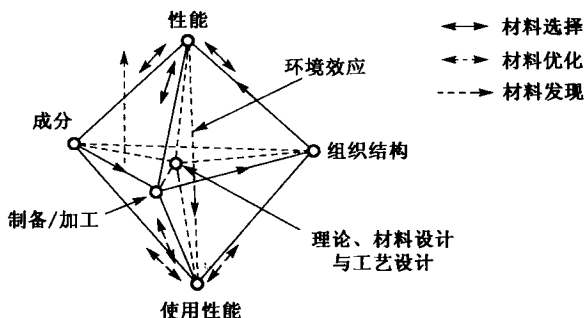


图 1-3 MSE 五要素、六面体以及材料设计与选择示意图

1.4.1 材料设计

材料设计是应用已知的材料信息、科学知识和实践经验,通过控制成分并提出其制备合成方案,预报和开发满足特殊要求的新材料的一种活动过程,其目的是改进已有的材料和开发新材料。

目前,材料设计可根据设计对象所涉及的空间尺度划分为材料性能层次、微观结构层次、原子分子层次和电子层次的设计,以及综合考虑各个层次的多尺度材料设计。所对应的相关学科如图 1-4 所示。分子动力学法与蒙特卡罗法、有限元等方法以及工程模拟等方法和技术是相应的研究工具。

材料设计的最关键步骤是建立物理模型与数学模型。依据材料科学基本原理和相关学科知识,考虑所设计的材料系统各组分的基本特征以及各主要成分的合金化特性等建立相应物理模型,通过有限个小型试样的试验、分析,建立各性能指标与成分之间的数学回归方程,并建立起相应的数学模型。在此基础上进行优化设计,经过计算,建立起可以预见的合金成分,再经过有限个实验确定出其成分—结构—合成与加工—性能—使用效能关系的最佳材料成分,然后经过扩大的实验室试验—半工业化生产阶段—工业化生产阶段,而每个阶段都必须进行工况条件下的应用研究、性能实验,最终达到工程上所需要的材料设计。